

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 004.942:621.1

Волощук В. А., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ВІДКРИТІ ІНТЕРАКТИВНІ АЛГОРИТМИ ДЛЯ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

Вдосконалені методи моделювання теплофізичних властивостей робочих тіл і перспективних енергоустановок, що базуються на використанні технології Mathcad Calculation Server і процедури посилання на «хмарні» ресурси. За допомогою запропонованих методів виконано моделювання та оптимізація деяких перспективних енергоустановок.

Ключові слова: енергоустановка, моделювання, оптимізація.

Вступ. Сьогодні в мережі Інтернет створені численні сайти, де можна отримати інформацію, що стосується властивостей робочих тіл і теплоносіїв енергетики, а також розрахунків різних типів енергоустановок. Така інформація представлена, в основному, у вигляді HTML-файлів, «мертвих» таблиць, графіків, методик розрахунків. Але, враховуючи багатофакторний вплив різних параметрів на роботу таких об'єктів, з цієї інформації не завжди можна отримати повну картину про залежність показників досліджуваних установок від вихідних даних. Особливо це стосується нових, перспективних енергоустановок, які ще потребують вивчення та дослідження.

Враховуючи сучасні можливості інформаційних технологій, при цьому виникає необхідність в розробці наукових основ створення і реалізації мережних, інтерактивних розрахункових ресурсів, що забезпечують збір, зберігання, а також інтелектуальну обробку інформації. Якщо говорити про енергоустановки, то важливою складовою таких ресурсів є відкриті інтерактивні алгоритми для моделювання теплофізичних властивостей робочих тіл, а також відкриті інтерактивні алгоритми для моделювання режимів роботи енергоустановок.

Мета роботи – удосконалення нових сучасних методів теплофізичного моделювання перспективних енергоустановок, що базуються на Інтернет-ресурсах.

Серед проаналізованих підходів моделювання теплофізичних властивостей робочих тіл і перспективних енергоустановок з використанням сучасних інформаційних технологій вибрані методи, що базуються на використанні Інтернет-ресурсів, які містять інформацію про

теплофізичні властивості робочих тіл, а також про енергоустановки і реалізують відкриті інтерактивні алгоритми. При цьому, такі Інтернет-ресурси видають користувачу чисельні результати про властивості робочих тіл, показники і критерії ефективності перспективних енергоустановок при заданих граничних умовах, а також графічну ілюстрацію отриманих результатів. Вихідні дані вводяться користувачем в інтерактивній формі. Крім чисельних та графічних даних, такі Інтернет-ресурси надають користувачу також додаткову інформацію, а саме: методику розрахунку; використані формули і математичний вид програми, включаючи послідовність дій; Mathcad-документ у вигляді копії даної програми [1].

При цьому користувач може вивчити та перенести на власний персональний комп'ютер: математичні формули для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл; аналогічні формули для розрахунку енергоустановок; програму, яка оперує теплофізичними властивостями робочих тіл і може бути використана при моделюванні енергоустановок.

Для чисельного моделювання енергетичних установок потрібні знання теплофізичних властивостей робочих речовин (води та/або водяної пари, повітря, димових газів, холодоагентів). Якщо такі розрахунки проводяться "вручну", то можна користуватися таблицями або графіками цих властивостей на лінії насичення чи в однофазній області. Якщо ж вони здійснюються на комп'ютері, то необхідні спеціальні програмні функції з визначення властивостей робочих речовин залежно від початкових параметрів.

Сьогодні майже всі комп'ютери, на яких проводяться інженерні (зокрема, теплофізичні) розрахунки, мають постійний швидкісний вихід в Інтернет. Виходячи з цього, запропоновано використовувати нову технологію роботи з функціями по визначенню теплофізичних властивостей робочих речовин теплоенергетики, яка використовує можливість посилення (refeience) на функції, що зберігаються на сайтах Інтернету – "в хмарах".

На рис. 1, для прикладу, показаний Інтернет-ресурс, який дозволяє проводити розрахунки теплофізичних властивостей холодоагенту R407c як в інтерактивній формі, так і з використанням технології посилення на функції з визначення властивостей цього холодоагенту (рис. 2, 3).

Якщо до посилення на функцію R407cPSVT(T) (рис. 1) підвести курсор миші і натиснути її праву кнопку, то з'явиться діалогове вікно, де можна знайти, позицію «Властивості». Якщо натиснути на цю по-

зицію, то відкриється ще одне діалогове вікно (див. рис. 2), де можна

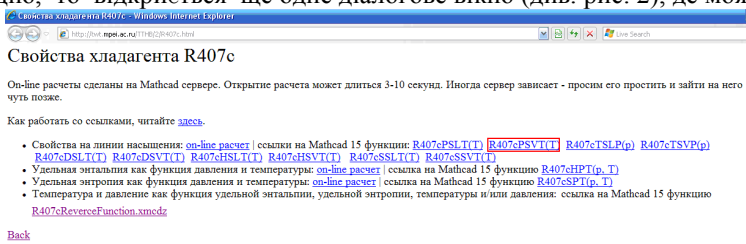


Рис. 1. Інтернет-ресурс для розрахунку теплофізичних властивостей холодоагенту R407c

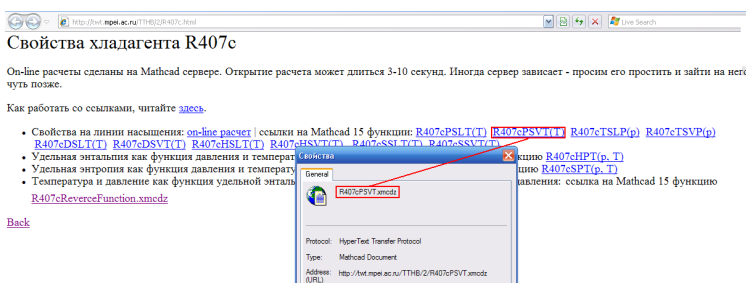


Рис. 2. Посилання на Інтернет-функцію

бачити і скопіювати в буфер обміну відповідну адресу, по якій в Інтернеті зберігається потрібна для розрахунку функція. Щоб ця функція стала видимою в розрахунку, необхідно в робочому Mathcad-документі зробити відповідне посилання на неї. Ця операція показана на рис. 3: в середовищі Mathcad з меню Вставка віддається команда посилання і в текстову область діалогового вікна, що з'явилося, вставляється адреса, скопійована з сайту (див. рис. 1 і 2).

Створені за допомогою такої технології як прямі, так і зворотні «хмарні» функції з визначення теплофізичних властивостей робочих тіл дозволяють також проводити з ними в середовищі Mathcad математичні операції інтегрування та диференціювання.

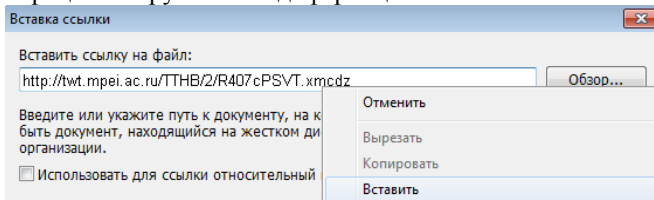


Рис. 3. Вставка посилання на Інтернет-функцію в розрахунок

Для прикладу, на рис. 4 показано використання прямих функцій (RHSVТ і RHSLT) для визначення ентальпії (H) сухої пари (SV) вибраного холодоагента і рідкого холодоагента на лінії насичення (SL) залежно від температури (T). Отримані значення ентальпії можна використовувати для визначення питомої кількості підведеної/відведеної теплоти. Ці ж значення теплоти можна отримати і з використанням

формули $\int_{s_1}^{s_2} T ds$, де T – зворотна функція (RTPS) для визначення температури (T) холодоагента в залежності від тиску (P) і ентропії (S).

Також, для прикладу, на рис. 5 і 6 наведений блок початкових даних, а також описана вище технологія посилань на функції з розрахунку властивостей холодоагентів для теплофізичного моделювання двоступеневого теплового насоса, який підготовлений за технологією Mathcad Calculation Server (технологія, яка дозволяє публікувати розрахунки в програмі Mathcad в мережі Інтернет з можливістю роботи з такими розрахунками в інтерактивному режимі, завантаження і з можливістю зверненню до посилань) [2, 3].

Також, для прикладу, на рис. 5 і 6 наведений блок початкових даних, а також описана вище технологія посилань на функції з розрахунку властивостей холодоагентів для теплофізичного моделювання двоступеневого теплового насоса, який підготовлений за технологією Mathcad Calculation Server (технологія, яка дозволяє публікувати розрахунки в програмі Mathcad в мережі Інтернет з можливістю роботи з такими розрахунками в інтерактивному режимі, завантаження і з можливістю зверненню до посилань) [2, 3].

Энтальпия рабочего тела на входе в компрессор $h_1 = \text{RHSVТ}(t_1) = 405.62 \text{ кДж/кг}$

Энтальпия рабочего тела на выходе из компрессора $h_2 = h_1 + h_k = 462.96 \text{ кДж/кг}$

Энтальпия рабочего тела на выходе из конденсатора $h_3 = \text{RHSLT}(t_3) = 282.404 \text{ кДж/кг}$

Энтальпия рабочего тела на входе в испаритель $h_4 = h_3 = 282.4 \text{ кДж/кг}$

Удельное количество теплоты, отдаваемое потребителю теплоты (формула 1) $q_{\text{потр}_1} = h_2 - h_3 = 180.556 \text{ кДж/кг}$

Удельное количество теплоты, отдаваемое потребителю теплоты (формула 2) $q_{\text{потр}_2} = \int_{s_3}^{s_2} \text{RTPS}(p_2, s) ds = 180.786 \text{ кДж/кг}$

Удельное количество теплоты, забираемое от источника (формула 1) $q_{\text{ист}_1} = h_1 - h_4 = 123.215 \text{ кДж/кг}$

Удельное количество теплоты, забираемое от источника (формула 2) $q_{\text{ист}_2} = \int_{s_4}^{s_1} \text{RTPS}(p_1, s) ds = 121.076 \text{ кДж/кг}$

Рис. 4. Використання прямих і зворотних «шмарних» функцій

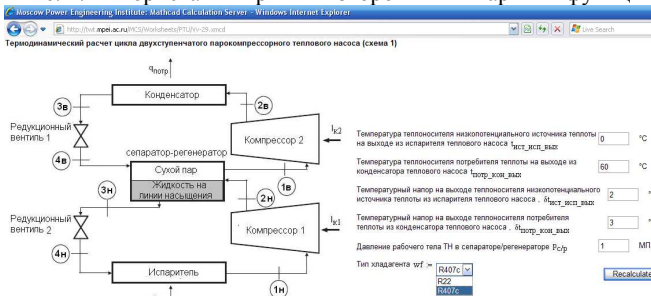
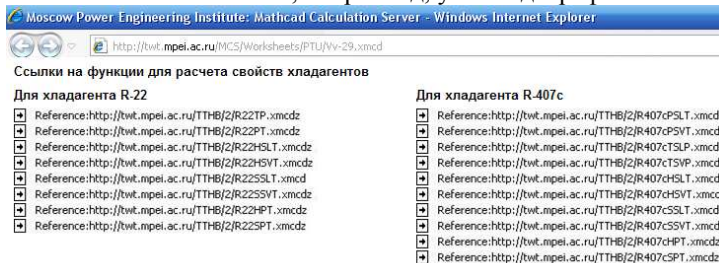


Рис. 5. Початкові дані для розрахунку двоступеневого теплового насоса

Знаходячись на відповідній сторінці Інтернету (наприклад <http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-29.xmcd>), змінюючи в інтерактивному режимі початкові дані, які знаходяться в спеціальних комірках (технологія Mathcad Calculation Server), і натискаючи «живу» клавішу Recalculate, можна розрахувати характеристики установки. Зробивши таким чином серію розрахунків, отримуємо масиви залежності параметрів роботи установки від введених початкових даних. Таку залежність можна вивести, наприклад, у вигляді графіків.



Формирование функций для расчета термодинамических свойств выбранного хладагента

$$RPSLT(T) := \begin{cases} R407cPSLT(T) & \text{if } wf = "R407c" \\ R22PT(T) & \text{if } wf = "R22" \end{cases} \quad RPSVT(T) := \begin{cases} R407cPSVT(T) & \text{if } wf = "R407c" \\ R22PT(T) & \text{if } wf = "R22" \end{cases}$$

Рис. 6. Формування функцій для розрахунку теплофізичних властивостей холодогентів за допомогою технології посилань

На рис. 7. показаний фрагмент сторінки Інтернет-ресурсу (адреса http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/VPU_Book_New/mas/index.html), де розміщені відкриті інтерактивні алгоритми для теплофізичного моделювання енергоустановок.

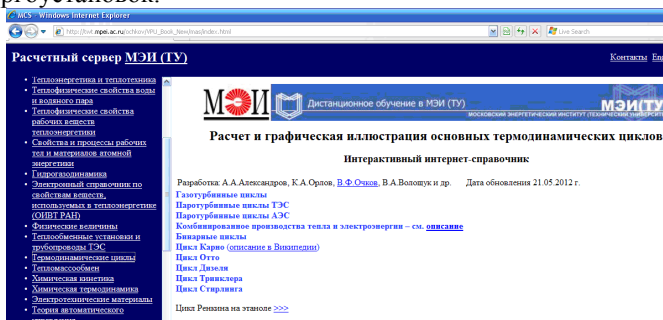


Рис. 7. Енергоустановки, для яких розроблені відкриті інтерактивні алгоритми з теплофізичного моделювання

Для прикладу наведемо результати теплофізичного моделювання парогазової установки з одноконтурним котлом-утилізатором за допомогою відкритого інтерактивного алгоритму, який розміщений за ад-

ресомо <http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-17-book.xmcd>.

Фрагмент блоку початкових даних наведений на рис. 8.

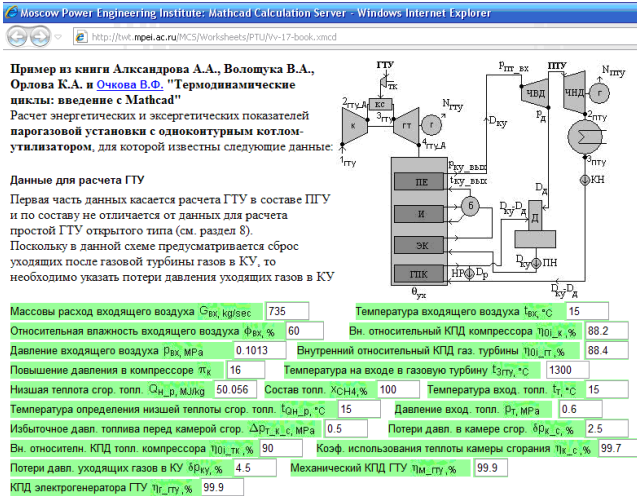


Рис. 8. Фрагмент початкових даних для теплофізичного моделювання парогазової установки

В даному прикладі досліджувався вплив тиску ($p_{ку_вых}$) і температури пари ($t_{ку_вых}$) на виході з котла-утилизатора на ККД ($\eta_{0_пгу}$) даної парогазової установки.

Для цього можна дискретно задавати значення тиску і температури пари, за допомогою клавіші Recalculate визначати значення ККД і сформувати таблицю або графік залежності даного ККД від заданих параметрів пари. Також можна створити з використанням «хмарних» функцій з визначення властивостей продуктів згорання, повітря, води/водяної пари в Mathcad-документі функціональну залежність $\eta_{0_пгу} = f(p_{ку_вых}, t_{ку_вых})$, алгоритм складання якої наведений на тій же сторінці – <http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-17-book.xmcd>.

Результати такого моделювання наведені на рис. 9.

З даного графіка видно, що при збільшенні температури свіжої пари в діапазоні $t_{ку_вых} = 450 - 550^\circ\text{C}$, при тиску свіжої пари $p_{ку_вых} = 4 \text{ МПа}$ і значеннях інших параметрів, які введені у вихідних даних, електричний ККД ПГУ збільшується від 54,7% до 55,0%. При цьому степінь сухості пари на виході з парової турбіни підвищується від 88,3% до 92,5%.

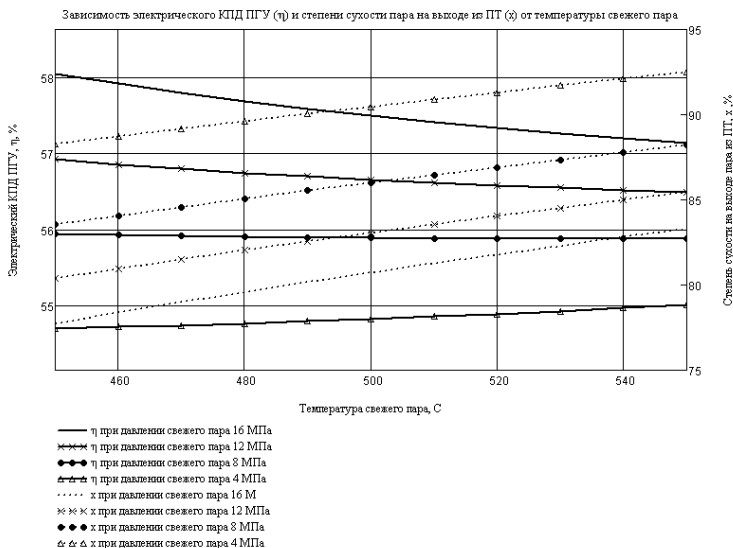


Рис. 9. Залежність електричного ККД ПГУ і ступеня сухості пари на виході з парової турбіни від температури свіжої пари

При збільшенні тиску свіжої пари, наприклад до значення $p_{ку_вих}=12$ МПа, електричний ККД ПГУ росте майже до 57%. Але, на відміну від кривої при $p_{ку_вих}=4$ МПа, при збільшенні температури в діапазоні $t_{ку_вих}=450 - 550^{\circ}\text{C}$ електричний ККД ПГУ, навпаки – зменшується від 56,9% до 56,5%.

Це обумовлено тим, що із збільшенням температури свіжої пари з одного боку росте теплоперепад в паровій турбіні, але з другого боку – зменшується витрата пари через турбіну. При меншому тиску, наприклад при $p_{ку_вих}=4$ МПа, із збільшенням температури $t_{ку_вих}$ теплоперепад росте швидше, ніж зменшується витрата пари. При більшому тиску, наприклад $p_{ку_вих}=12$ МПа, теплоперепад росте повільніше, ніж зменшується витрата пари. При цьому ступінь сухості пари у порівнянні з тиском $p_{ку_вих}=4$ МПа зменшується до 80,4% - 85,5%.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що хоча збільшення тиску свіжої пари викликає збільшення ККД ПГУ, при тиску $p_{ку_вих}>8$ МПа ступінь сухості пари на виході з парової турбіни зменшується до гранично допустимих значень, що обумовлює застосування додаткових технічних рішень зі збільшення ступеня сухості або боротьби з ерозією лопаток вихідних ступенів парової турбіни: проміжний перегрів пари, влаштування сепаратора вологи, організація каналів

дренажу вологи в конденсатор, застосування високоякісної сталі або накладок для лопаток турбін тощо.

Як правило, при теплопостачанні об'єктів житлово-комунального сектору, теплові насоси проектується на покриття не повного, а так званого базового теплового навантаження. Деяка частина навантаження, так зване пікове навантаження, покривається піковим джерелом (електричний нагрівник, піковий газовий котел тощо). Пікові теплові навантаження мають місце під час дуже холодних періодів і впродовж досить короткого проміжку часу (рис. 10).

Частка покриття базового або пікового теплового навантаження як правило визначається на основі техніко-економічного обґрунтування. Це є випадок вирішення оптимізаційної задачі, в якій потрібно врахувати досить широкий спектр впливаючих факторів (кліматичні умови, технологічні параметри, вартісні показники тощо).

На рис. 11 показаний приклад техніко-економічного обґрунтування за допомогою розробленого відкритого інтерактивного алгоритму (<http://twm.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-31.xmcd>) частки базового теплового навантаження, що покривається тепловим насосом.

Із рис. 11 бачимо, що існує оптимальне значення α встановленої потужності теплового насоса, при якій термін окупності влаштування цієї енергоустановки мінімальний.

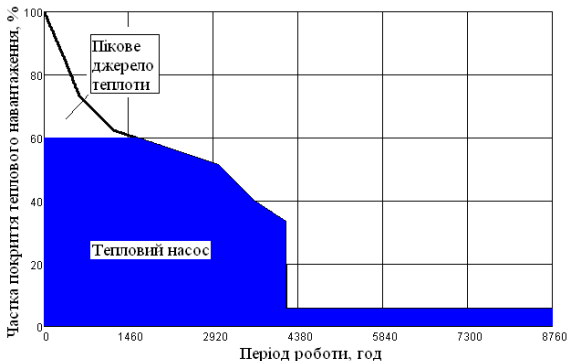


Рис. 10. Приклад покриття теплового навантаження базовим та піковим джерелом теплоти

В рамках даної роботи також розроблені ряд інших відкритих інтерактивних алгоритмів для теплофізичного моделювання властивостей робочих тіл (холодоагент R-22; деякі робочі тіла атомної енергетики), а також енергоустановок (ГТУ з багатоступеневим стиском повітря, ГТУ з багатоступеневим підводом тепла, ГТУ-ТЕЦ, ряд схем ПГУ, що

використовують в своїй основі як прості, так і складні цикли), за допомогою яких виконані відповідні термодинамічні розрахунки а також техніко-економічне обґрунтування.

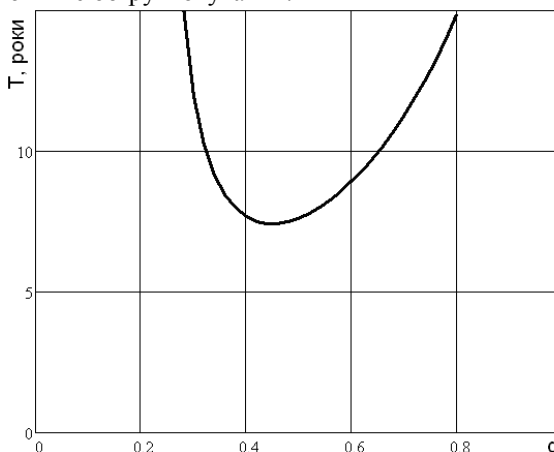


Рис. 11. Залежність бездисконтного терміну окупності інвестицій T від встановленої потужності теплового насосу α

Дана робота виконана при фінансовій підтримці Російського фонду фундаментальних досліджень (проект №12-08-90900-моб_снг_ст).

Висновки. Вдосконалені методи моделювання теплофізичних властивостей робочих тіл і перспективних енергоустановок, що базуються на використанні технології Mathcad Calculation Server і процедури посилення на «хмарні» ресурси.

Створені прямі та зворотні «хмарні» функції з визначення теплофізичних властивостей робочих тіл.

З використанням вдосконалених методів моделювання розроблені ряд відкритих інтерактивних алгоритмів для теплофізичного моделювання властивостей робочих тіл, а також енергоустановок.

За допомогою запропонованих методів теплофізичного моделювання та інтерактивних алгоритмів визначені оптимальні параметри термодинамічних циклів ряду ГТУ, ПГУ і теплових насосів з різними робочими тілами. З використанням загальноприйнятих в світовій економічній практиці показників виконано техніко-економічне обґрунтування теплонасосної станції для потреб тепlopостачання в різних кліматичних умовах і з урахуванням вартісних чинників.

1. Очков В.Ф. Анализ Интернет–объектов, содержащих информацию о теплофизических свойствах рабочих тел / В. Ф. Очков, Е. Е. Устюжанин, В. Е. Зна-

менский // Труды Академэнерго. – 2011. – № 1. – С. 110–123. 2. Волощук В. А. Термодинамическая оптимизация циклов некоторых ГТУ и ПГУ при помощи современных информационных технологий часть 1 / В. А. Волощук, В. Ф. Очков, К. А. Орлов // Новое в российской электроэнергетике. – 2011. – № 7. – С. 23–42. 3. Волощук В. А. Термодинамическая оптимизация циклов некоторых ГТУ и ПГУ при помощи современных информационных технологий часть 2 / В. А. Волощук, В. Ф. Очков, К. А. Орлов // Новое в российской электроэнергетике. – 2011. – № 7. – С. 15–25.

Рецензент: д.т.н., профессор Бомба А. Я. (НУВГП)

Voloshchuk V. A., Candidate of Engineering, Associate Professor
(National University of Water Management and Nature Resources Use,
Rivne)

OPEN INTERACTIVE ALGORITHM FOR THERMOPHYSICAL SIMULATION OF POWER UNITS

Methods of thermophysical simulation of working fluids properties and power units which use the technology Mathcad Calculation Server and procedure of reference to “cloud” resources are improved. Simulation and optimization of some power units are made with the help of introduced methods.

Keywords: power unit, modeling, optimization.

Волощук В. А., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ОТРЫТЫЕ ИНТЕРАКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Усовершенствованы методы моделирования теплофизических свойств рабочих тел и перспективных энергоустановок, которые базируются на использовании технологии Mathcad Calculation Server и процедуры ссылки на «облачные» ресурсы. При помощи предложенных методов выполнено моделирование и оптимизация некоторых перспективных энергоустановок.

Ключевые слова: энергоустановка, моделирование, оптимизация.
